

DOI: 10.5846/stxb201605220984

朱平阳, Heong Konglueen, Sylvia VILLAREAL, 吕仲贤. 氮肥影响节肢动物天敌对褐飞虱种群的自然控制作用. 生态学报, 2017, 37(16): 5542-5549.

Zhu P Y, HEONG Konglueen, Sylvia VILLAREAL, Lü Z X. Application of nitrogen fertilizer affects natural control of the rice brown planthopper (*Nilaparvata lugens* Stål) by arthropod natural enemies. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(16): 5542-5549.

氮肥影响节肢动物天敌对褐飞虱种群的自然控制作用

朱平阳^{1,2}, Heong Konglueen^{3,4}, Sylvia VILLAREAL³, 吕仲贤^{1,*}

1 浙江省植物有害生物防控重点实验室省部共建国家重点实验室培育基地, 浙江省农业科学院植物保护与微生物研究所, 杭州 310021

2 金华市植物保护站, 金华 321017

3 国际水稻研究所, DAPO Box 7777, 马尼拉, 菲律宾

4 浙江大学昆虫科学研究所, 杭州 310021

摘要: 氮肥在增加粮食产量的同时也可能对整个农田生态系统产生负面影响。稻田过量施用氮肥后, 会提高水稻对害虫的敏感性、改变害虫与天敌之间的关系, 最终影响到天敌对害虫的自然控制功能, 导致害虫大发生。为了合理、公正地评价施用氮肥对稻田节肢动物天敌对害虫自然控制能力的影响, 探索性地应用笼罩的方法在菲律宾国际水稻研究所试验农场稻田中研究了害虫天敌在不同氮肥施用水平(0, 100 kg N/hm² 和 200 kg N/hm²) 稻田中对褐飞虱的捕食能力及自然控制作用。试验结果表明, 旱季田间的捕食性天敌对褐飞虱若虫的捕食能力和主要天敌对褐飞虱种群的自然控制能力均随稻田氮肥施用量的增加而减弱。在雨季, 虽然天敌对褐飞虱种群的自然控制能力也随稻田氮肥施用量的增加而减弱, 但捕食性天敌对褐飞虱若虫捕食能力的差异不明显。本研究表明, 天敌对褐飞虱自然控制能力的减弱是稻田过量施用氮肥后褐飞虱种群猖獗的主要原因之一。

关键词: 稻田; 氮肥; 天敌; 捕食作用; 自然控制

Application of nitrogen fertilizer affects natural control of the rice brown planthopper (*Nilaparvata lugens* Stål) by arthropod natural enemies

ZHU Pingyang^{1,2}, HEONG Konglueen^{3,4}, Sylvia VILLAREAL³, LÜ Zhongxian^{1,*}

1 State Key Laboratory Breeding Base for Zhejiang Sustainable Pest and Disease Control, Institute of Plant Protection and Microbiology, Zhejiang Academy of Agriculture Sciences, Hangzhou 310021, China

2 Jinhua Plant Protection Station, Jinhua 321017, China

3 International Rice Research Institute, DAPO Box 7777, Metro Manila, Philippines

4 Institute of Insect Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310021, China

Abstract: Rice crop yields often increase with applications of nitrogenous fertilizer. However excessive nitrogen use can also increase the susceptibility of the crop to pests and diseases. In addition excess nitrogen in water systems is a pollutant that can threaten aquatic fauna and human health. Increased crop susceptibility to insect pests also affects the relationship between pests and their natural enemies and thus can reduce natural control that can potentially result in outbreaks. To evaluate these effects of nitrogen on the natural control of insect pests by arthropod natural enemies in rice field, we experimentally explored the predation ability and natural control capacity by arthropod natural enemies on the rice brown planthopper (BPH), *Nilaparvata lugens* Stål using different nitrogen fertilizer regimes in field plots conducted in the International Rice Research Institute, Philippines. The natural enemy exclusion method was used in filed plots where

基金项目: 国家重点研发计划支持项目(2016YFD0200800); 浙江省重点研发计划(2015C02014); 浙江省植物有害生物防控省部共建国家重点实验室培育基地自主设计项目(2010DS700124-ZZ1601)

收稿日期: 2016-05-22; **网络出版日期:** 2017-03-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: luzxmh@163.com

nitrogen (0, 200 kg N /hm² and 200 kg N /hm²) was applied at and repeated for both the dry and wet season. BPH and natural enemy densities of inside the exclusion cages were monitored using the Blower-vac insect suction device. The predatory capacities on BPH nymphs by generalist predators, and the functions of natural biological control on BPH populations by natural enemies including predators and parasitoids were studied. Results showed that the predation ability of natural enemies and the natural control functions were significantly weakened with the increasing use of nitrogen fertilizer in dry season. Predation rates of natural enemies with the highest nitrogen use (200 kg N /hm²) were all lower than 40%. Nitrogen levels, rice growth stages and their interaction had significant effects on the predation ability. The rate of natural control (RNC) in rice fields with no nitrogen application (0 kg N /hm²) in the different growth stages was more than 95%, highest among the 3 nitrogen fertilizer levels. The natural biological control functions in wet season had no significant effects on the predation ability in the different levels of nitrogen fertilizer. The different nitrogen fertilizer levels had no effects on the natural enemies. Meanwhile obvious higher densities of the natural biological control functions of BPH in rice fields applied with high usage of nitrogen fertilizer than that with low. This phenomenon indicates that a high nitrogen fertilizer application decreased the control ability of the natural enemies, on the other hand, the BPH population increases too fast with the high nitrogen fertilizer application, that beyond their natural enemies' control ability. Our results strongly supports the conclusion that excessive applications of nitrogen fertilizer in rice fields make them vulnerable to BPH outbreaks through weakening of the natural control functions of the natural enemies.

Key Words: rice field; nitrogen fertilizer; natural enemy; predation; natural control

农民为追求水稻高产,自从 20 世纪 60 年代中期掀起了“绿色革命”浪潮,广泛施用以氮肥为主的化学肥料。目前,我国稻田的氮肥施用量大大高于世界平均施用量,氮肥的连续过量施用不但会造成农田污染,而且也是导致水稻主要害虫褐飞虱(*Nilaparvata lugens* Stål)从次要害虫转变为主要害虫的重要原因之一^[1-3]。过量施用氮肥不仅增加稻株生物量、改善了植食性昆虫的营养条件,能够显著促进植食性昆虫的取食、延长寿命、提高生殖力和卵孵化率^[4],而且也改变害虫天敌的生境及其对猎物捕食能力(或寄生能力)^[5],进而会影响稻田生态系统中整个节肢动物的食物链和食物网^[6-7],最终可能会影响天敌对害虫的自然控制功能^[1,8-11]。

尽管已有不少研究报道了温度^[12-13]、寄主植物^[14]、猎物^[15]、农药和生境对天敌控制稻飞虱能力的影响^[16-18],氮肥对水稻害虫天敌的数量影响也有报道^[19-20],过量施用氮肥可削弱捕食性天敌对替代猎物果蝇蝇的捕食能力^[19],但氮肥过量施用后对整个稻田生态系统的影响还远没有像化学农药那样得到准确评价。为了合理、公正地评价氮肥对稻田生态系统,特别是天敌对害虫自然控制能力的影响,本研究主要在田间条件下以笼罩方法研究了在不同氮肥施用水平稻田中的节肢动物天敌对主要水稻害虫褐飞虱的捕食能力,同时探索性地评价了所有节肢动物天敌对褐飞虱种群的综合自然控制作用。研究结果可以为我国正在开展的稻田化学肥料和农药减量使用技术的进一步研究和推广提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 田间试验设计和管理

试验在菲律宾国际水稻研究所农场(13°14' N, 121°15' E, 海拔 22 m)进行,水稻品种为 IR64。设置 200, 100 kg N /hm² 和 0 kg N /hm² 3 个氮肥施用水平处理、每处理重复 4 次,完全随机列区设计。每个小区面积为 12.5 m×33 m,小区安排如图 1 所示。为了避免氮肥渗漏或在小区之间互窜,各小区有独立的排灌水系统,试验田四周均有较大的排水沟。

分别在旱季和雨季重复进行同样的试验。种子露白后进行旱地育秧,分别于 14 日龄和 24 日龄的 IR64 秧苗进行人工移栽,每穴插 2—3 苗,行间距为 20 cm×20 cm。氮肥为尿素,分别于移栽前、移栽后 10 d 和分蘖盛期各施用总氮肥施用量的 30%、30%和 40%。全生育期不施用任何农药,水管理正常。

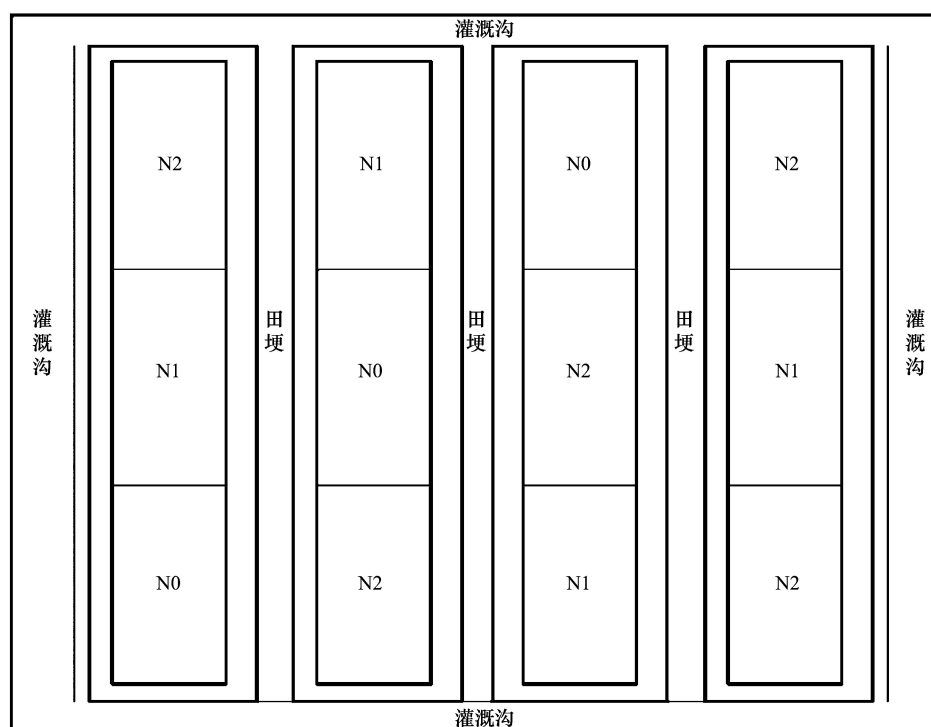


图1 稻田小区及灌溉系统设计

Fig.1 Design of irrigation system in paddy field trial

N0, N1 和 N2 分别代表氮肥使用量 0, 100 kg/hm² 和 200 kg/hm²

1.2 不同氮肥水平稻田中捕食性天敌对褐飞虱若虫的捕食能力测定

为测定不同氮肥水平稻田中捕食性天敌对褐飞虱若虫的捕食能力,在水稻移栽后第2天,每个小区设6个用4根竹竿固定的60目尼龙纱笼(长×宽×高:40 cm×40 cm×135 cm),笼内罩4丛水稻,3个一排,纱笼离田埂2 m,笼间距5 m,分别标记为“A”或“B”(图2)。纱笼底部嵌入泥中以免水生动物进入笼内,纱笼顶部用塑料线捆扎封口。在移栽后20 d,即分蘖期盛期,将笼子上口打开,尼龙纱下移使笼子上口与水稻叶冠齐平,以便笼外的节肢动物能自由进出。在清理了笼内稻苗的基部老叶后,再用Blower-vac吸虫器将可能由稻苗或水流带入笼内的所有节肢动物清除。在标有“B”的笼内稻株基部接入50头同一天孵化的4龄后期褐飞虱若虫,而在标有“A”的笼子作为空白对照以确定是否有褐飞虱若虫从笼外迁入,作为被捕食褐飞虱数量的校正。3 d后再用Blower-vac吸虫器采集笼内所有节肢动物,特别注意收集水面上的若虫,并保存在75%的酒精溶液中。取样后立即用塑料线捆扎将笼子顶部封闭。本试验分别在孕穗期和乳熟期采用同样的方法各进行一次。样品带回实验室,在解剖镜下考查每个笼内的褐飞虱若虫数,计算被捕食的若虫数。

1.3 不同氮肥水平稻田中天敌对褐飞虱的自然控制能力测定

为测定不同氮肥水平稻田中所有类型天敌对褐飞虱的自然控制能力,在水稻移栽后第2天,再在每个小区设2个与上述同样的尼龙纱笼,顶部用塑料线捆扎封口,标记为“C1”(图2)。移栽后第20天,在离“C1”5 m处再设同样大小的纱笼2只,笼内罩4丛水稻,笼子上口打开,标为“C2”,笼内稻株上的节肢动物天敌与笼外田间天敌可以自由交流平衡。3 d后,打开“C1”笼子上口,去除笼内水稻的基部叶鞘,再用Blower-vac吸虫器清理,以确保笼内无任何天敌。在每个笼内接入5对刚羽化的褐飞虱成虫,顶部用塑料线捆扎再封口。3周后打开笼子,将笼内所有节肢动物用Blower-vac吸虫器取样,并将样品保存在75%的酒精溶液中。样品带回实验室,在解剖镜下鉴定笼内的所有节肢动物天敌的种类和数量,同时考查褐飞虱的数量。用同样的方法,在抽穗初期再进行1次。计算天敌对褐飞虱种群的自然控制率:

$$RNC = (1 - a/b) \times 100\%$$

式中, a 为有天敌笼内的褐飞虱数量; b 为无天敌笼内的褐飞虱数量。

1.4 数据统计与分析

所有数据采用 SPSS 软件进行分析, 百分数先进行反正弦转化、计数属性的数据用对数转化后进行统计。

2 结果与分析

2.1 不同氮肥水平稻田中广食性天敌对褐飞虱若虫的捕食能力

在旱季, 低氮 (0 kg N/hm^2) 和中氮 (100 kg N/hm^2) 稻田中天敌对褐飞虱若虫的捕食能力均随水稻的生长而增强, 但低氮稻田的增强速率高于中氮稻田, 而在高氮 (200 kg N/hm^2) 稻田中的捕食能力则均保持在 40% 以下, 不同水稻生育期相对稳定。由于 3 个氮肥水平的稻田在水稻分蘖期的捕食能力无明显差异 ($P = 0.1173$), 从而导致在孕穗期和乳熟期捕食性天敌对褐飞虱若虫的捕食能力随稻田氮肥水平的提高而显著下降 (孕穗期 $P = 0.0364$; 乳熟期 $P = 0.0009$) (图 3), 方差分析结果表明, 水稻生育期 ($P < 0.0001$)、氮肥水平 ($P < 0.0001$) 及其它们的交互作用 ($P = 0.0076$) 均显著影响天敌对褐飞虱若虫的捕食能力。但是在雨季, 不同氮肥水平稻田中的天敌对褐飞虱若虫的捕食能力均随水稻的生长而减弱, 但不同氮肥水平的稻田之间差异不显著 (分蘖期 $P = 0.7192$; 孕穗期 $P = 0.7486$; 乳熟期 $P = 0.5611$) (图 3b)。对不同季节的捕食能力进行方差分析, 结果表明氮肥水平、季节 $\times$ 生育期、季节 $\times$ 氮肥均显著影响天敌对褐飞虱若虫的捕食能力 (表 1), 说明氮肥是影响天敌捕食能力的主要因子。

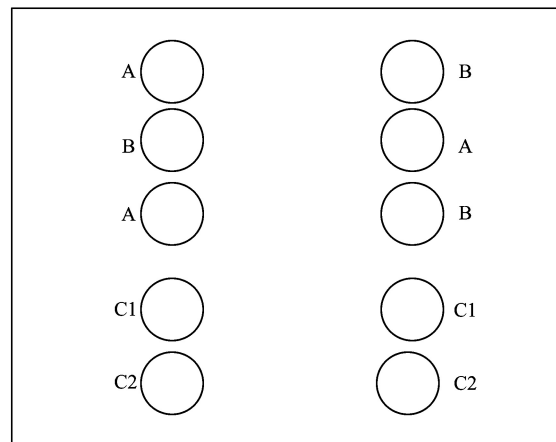


图 2 小区内笼罩设置示意图

Fig.2 Schematic diagram of nylon cages in each plot

A, B, C1 和 C2 为尼龙纱笼的位置, 每笼含 4 丛水稻

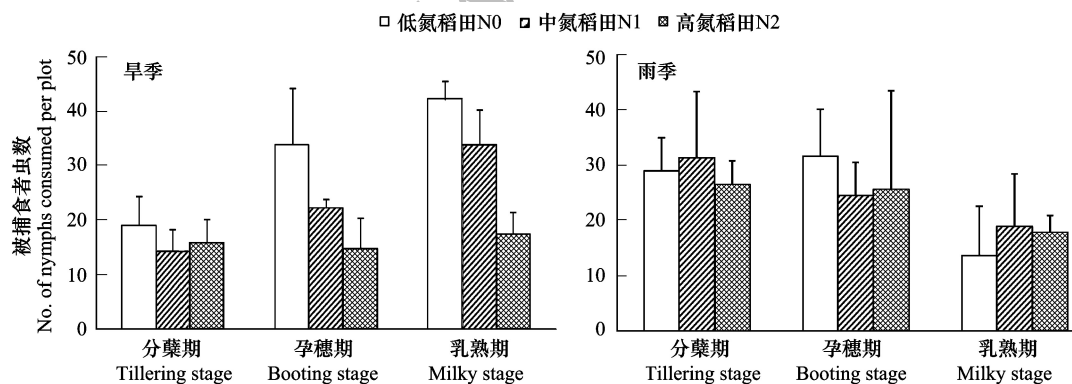


图 3 不同氮肥水平稻田天敌对褐飞虱若虫的捕食能力

Fig.3 Predatory capacity of generalist predators on BPH nymphs in rice fields

图中数据为平均值 $\pm$ 标准误

2.2 不同氮肥水平稻田中天敌对褐飞虱种群的自然控制作用

对褐飞虱种群的自然控制是捕食性和寄生性天敌共同作用的结果。在 3 个氮肥水平的稻田中低氮稻田的自然控制率 (RNC) 最高 (图 4), 在雨季和旱季的不同水稻生育期均大于 95%, 即天敌能完全控制褐飞虱种群的发展。除雨季水稻生殖生长期外, 低氮水平稻田的自然控制率均显著高于高氮水平稻田的值 (旱季: 营养生长期, $P = 0.0047$; 生殖生长期, $P = 0.0378$; 雨季: 营养生长期, $P = 0.0014$)。对不同季节的自然控制能力进行方差分析, 结果表明氮肥、生育期、季节 $\times$ 生育期、季节 $\times$ 生育期 $\times$ 氮肥均显著影响自然控制能力 (表 1), 说明氮肥和水稻生育期均是影响天敌自然控制能力的主要因子。

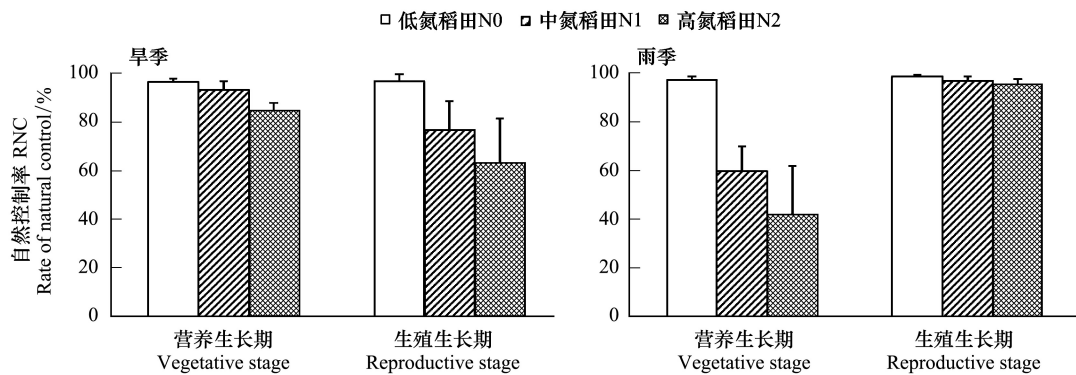


图 4 不同氮肥水平稻田天敌对褐飞虱种群的自然控制作用

Fig.4 Natural control of brown planthopper population by nature enemies in rice fields with different nitrogen regimes

图中数据为平均值 ± 标准误

表 1 稻田天敌对褐飞虱若虫的捕食能力和对褐飞虱种群的自然控制功能的方差分析

Table 1 ANOVA of the predatory capacity of generalist predators on BPH nymphs and the natural control by nature enemies on BPH population

变异源 Source of variation	自由度 <i>df</i>	对若虫的捕食能力 Predatory capacity on BPH nymphs		对种群的自然控制 Natural control function on BPH population	
		<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
季节 S	1	0.14	0.7132	2.26	0.1430
氮肥 N	2	7.16	0.0019	21.97	<0.0001
生育期 G	2	0.79	0.461	8.79	0.0059
季节×氮肥 S×N	2	4.98	0.0109	0.86	0.4331
季节×生育期 S×G	2	18.21	<0.0001	45.84	<0.0001
生育期×氮肥 G×N	4	1.34	0.2674	2.43	0.1056
季节×生育期×氮肥 S×G×N	4	1.91	0.1243	12.60	<0.0001

S: Season, N: Nitrogen regime, G: Growth stage, BPH: Brown planthopper

对褐飞虱的所有节肢动物天敌取样结果表明,在 3 个不同的氮肥水平下褐飞虱的主要天敌种类是共有的,主要包括蜘蛛目的拟环纹豹蛛 *Pardosa pseudoannulata*,台湾裂头小皿蛛 *Callitrichia formosana*,肖蛸 *Tetragnatha* sp.,锯螯蛛 *Dyschiriognatha* sp. 和园蛛 *Araneus* sp.;半翅目的黑肩绿盲蝽 *Cyrtorhinus lividipennis*,道氏微宽肩蝽 *Microvelia douglasi*,水蝽 *Mesovelia vittigera* 和暗条泽背龟蝽 *Limnogonus fossarum*;鞘翅目的稻红瓢虫 *Micraspis* sp.;直翅目的长翅黄蛉蟋 *Anaxipha longipennis*,长翅草螽 *Conocephalus longipennis*,小螳 *Agriocnemis* sp.;膜翅目的缨小蜂 *Anagrus* sp.,寡索赤眼蜂 *Oligosita* sp.,柄翅小蜂 *Gonatocerus* sp.。氮肥施用量对稻田中的褐飞虱节肢动物天敌种类没有影响。

在水稻营养生长期,除旱季中氮水平稻田膜翅目天敌种群数量显著高于高氮和低氮水平稻田 ($P=0.0092$) 以及雨季低氮水平稻田中蜘蛛目天敌的种群数量显著高于高氮水平稻田 ($P=0.0071$) 外,3 种不同氮肥施用量稻田中的褐飞虱天敌种群数量无显著差异。在水稻生殖生长期,除不同氮肥施用量稻田中膜翅目天敌种群数量在旱季和雨季都无显著性差异外,高氮水平稻田中的天敌种群数量都要显著高于低氮水平稻田 (旱季:蜘蛛目, $P<0.001$;半翅目, $P=0.0020$;雨季:蜘蛛目, $P<0.0001$;半翅目, $P<0.0001$) (表 2)。

3 讨论

植物的质量、结构和分布在极大程度上影响植物、植食性昆虫和天敌之间的相互关系^[21-25]。寄主植物可通过改变组织内的生物化学成分及含量等途径影响植食性昆虫的存活和发育^[10,26-28],从而影响到天敌的生活史^[29]。氮是植物主要的营养元素,植物施用氮肥后可能会导致整个食物链结构发生变化,从而影响到天敌种

群的功能^[9, 30]。

表 2 不同氮肥水平稻田中褐飞虱主要天敌的种群数量

Table 2 The population of the dominant arthropod natural enemy species of BPH

季节 Season	不同氮肥水平稻田 Rice fields with different nitrogen fertilize	蜘蛛目 Araneae/(头/4丛)		半翅目 Hemiptera/(头/4丛)		膜翅目 Hymenoptera/(头/4丛)	
		营养生长期 Vegetative	生殖生长期 Reproductive	营养生长期 Vegetative	生殖生长期 Reproductive	营养生长期 Vegetative	生殖生长期 Reproductive
旱季 Dry season	低氮稻田 N0	2.03±0.33	43.75±2.32b	0.41±0.12	29.88±2.24b	0.06±0.04b	5.75±0.31
	中氮稻田 N1	1.97±0.24	42.88±2.32b	0.25±0.09	25.00±1.70b	0.25±0.07a	5.38±0.42
	高氮稻田 N2	1.97±0.29	61.25±2.30a	0.25±0.08	36.00±1.68a	0.03±0.03b	5.59±0.32
雨季 Wet season	低氮稻田 N0	4.16±0.31a	5.88±0.33b	0	6.19±0.28b	0.16±0.07	0.91±0.13
	中氮稻田 N1	3.53±0.25ab	9.06±0.61ab	0	8.47±0.35ab	0.41±0.12	0.91±0.14
	高氮稻田 N2	2.88±0.19b	11.88±0.50a	0	11.81±0.54a	0.50±0.15	1.25±0.16

蜘蛛目 Araneae:拟环纹豹蛛 *P. pseudoannulata*, 台湾裂头小皿蛛 *C. formosana*, 肖蛸 *Tetragnatha* sp., 锯螯蛛 *Dyschiriognatha* sp. 和园蛛 *Araneus* sp.; 半翅目 Hemiptera: 黑肩绿盲蝽 *C. lividipennis*, 道氏微宽肩蝽 *M. douglasi*, 水蝽 *M. vittigera* 和暗条泽背胝蝽 *Limnogonus fossarum*; 膜翅目 Hymenoptera: 缨小蜂 *Anagrus* sp., 寡索赤眼蜂 *Oligosita* sp., 柄翅小蜂 *Gonatocerus* sp.; 表内数据均为平均值±标准误

氮肥对褐飞虱的贡献大于磷肥和钾肥,氮肥不但能够提高稻株内的氮营养水平,还能提高褐飞虱体内的氮含量,而施用磷肥和钾肥对褐飞虱体内磷和钾含量无影响^[9]。此外,氮肥还能够提高水稻中水溶性蛋白的含量,减少硅含量,从而提高稻株对褐飞虱的适口性,促进取食,降低水稻抗性,并能显著提高褐飞虱的生态适应性^[9-10]。稻株内的氮营养可能会影响更高的营养层,提高捕食者的种群密度^[31],它是捕食者对植食者(猎物)生物量增加的直接表现^[32]。由捕食性和寄生性天敌引起的害虫死亡是决定害虫种类数量的主要生物因子^[33]。虽然,捕食性天敌和寄生性天敌均为亚洲稻区的优势天敌^[16, 34-35],但是,在稻飞虱迁入稻田初期和种群建立过程中广食性的捕食天敌比寄生性天敌在抑制稻田害虫种群中发挥更重要的作用^[33, 36]。在菲律宾稻区,拟环纹豹蛛(*Pardosa pseudoannulata*)的密度比较高,占蜘蛛总数量的 25%—54%^[37],它被认为是能有效调节稻飞虱和叶蝉种群的主要自然控制因子,也是褐飞虱的最主要捕食者^[38]。在稻田—蜘蛛—稻飞虱食物链系统中,拟环纹豹蛛对稻田飞虱的自然控制作用是一个比较成功的例子^[34]。

虽然捕食性天敌的捕食作用被公认为褐飞虱种群的重要控制因子,但是已有的研究很少对它们在田间的自然控制进行准确的定量和评价^[15-16, 33]。应用笼罩的方法在印度尼西亚和柬埔寨稻田就天敌对褐飞虱卵的寄生和捕食作用进行试验性的定性比较^[16, 39]。由于寄生蜂和黑肩绿盲蝽均能攻击褐飞虱卵,加上卵的数量无法确定,所以试验不能准确定量捕食性天敌的具体控制能力,无法合理评价捕食性天敌对褐飞虱的有效控制作用。本文在前人的基础上利用改进的田间回捕法,能够间接评价不同氮肥水平稻田中捕食性天敌对猎物的捕食功能。试验结果表明,氮肥水平会影响广食性天敌捕食褐飞虱若虫的能力,捕食性天敌对褐飞虱若虫的捕食能力随稻田氮肥水平的提高而显著下降(图 3),高氮水平稻田中广食性天敌的捕食能力保持在 40%以下,且稻田中广食性捕食天敌对褐飞虱若虫的捕食能力均随水稻的生长而增强。但不同季节也会影响捕食性天敌对稻飞虱的捕食功能,如在雨季稻田,不同氮肥水平稻田中的广食性捕食天敌对褐飞虱若虫的捕食能力均随水稻的生长反而减弱,且不同氮肥水平稻田之间也无显著差异。尽管广食性捕食天敌的种群数量会随着氮肥施用量的增加而增加,但对褐飞虱种群的自然控制功能反而降低了(表 2,图 4),这一现象表明,一方面高氮肥的施用降低了褐飞虱天敌的控害能力,另一方面,高氮肥的施用使褐飞虱种群增长过快,褐飞虱天敌有一定滞后性,在自条件下已超出了他们现有的控害能力范围,最终两者的综合作用导致稻田中褐飞虱天敌自然控制功能的下降。

应用改进的回捕技术能较为准确地测定和评价不同氮肥水平稻田的捕食性天敌对褐飞虱若虫的捕食能力,而对褐飞虱若虫捕食能力的显著差异可能与天敌的密度和天敌与褐飞虱的数量比密切相关。在低氮稻田中较高的捕食能力可能取决于捕食性天敌,特别是拟环纹豹蛛对取食低氮稻株的褐飞虱有更高的消耗力^[19]。

寄生性天敌对水稻害虫种群的控制也具有十分重要的意义,对它们的保护和利用已成为害虫治理的主要

内容,在亚洲稻区通过调节非稻田生境技术提高寄生性天敌的种群密度被认为是改进自然控制作用的有效途径^[16,18,40]。在稻田生态系统中,对褐飞虱的自然控制作用是捕食性和寄生性天敌共同作用的结果,但对各自的作用很难进行单独的分析。本试验中,在雨季水稻的营养生长阶段,低氮肥水平稻田中天敌对褐飞虱的自然控制作用(RNC)显著高于其它两个氮肥水平稻田(图4),但是该时期3个氮肥水平稻田的捕食性天敌对褐飞虱若虫的捕食能力却基本相同(图3),因此寄生性天敌对抑制褐飞虱种群的有效作用值得肯定,从而再次证明水稻生长前期避免施用杀虫剂以保护和提高天敌的自然控制作用具有重要意义^[41]。尽管 Blower-vac 吸尘器取样调查到的寄生性天敌很有限(表2),这可能是由于采样调查时并非褐飞虱的卵孵高峰,大部分寄生性天敌未处于成虫阶段,吸尘器采样法无法采集到稻田中寄生性天敌。对于稻田中褐飞虱膜翅目天敌的调查方法还有待改进。在低氮肥水平稻田中对褐飞虱自然控制作用的提高可能与低氮稻株对寄生性天敌的吸引力增强、低氮稻田中捕食性天敌的捕食作用提高以及低氮稻株上天敌对猎物搜索速率的加快有关。

氮肥的过量使用可能会减弱水稻的抗病虫害能力^[10],继而增加防治虫害的农药用量,给水稻的安全生产带来极大隐患。氮肥的过量使用也极易使庄稼倒伏,引起粮食减产。当氮肥量超过土壤保有能力时,就会迁移至周围的土壤中,形成农业面源污染。过量的氮肥还可能会渗入地下水中,使地下水硝酸盐含量增加,污染水环境。本研究从氮肥水平对稻田中褐飞虱捕食性天敌短期的捕食能力的影响,及氮肥水平对稻田中褐飞虱所有天敌的自然控制作用的影响入手,客观评价了氮肥水平对褐飞虱及其天敌的作用,结果表明稻飞虱天敌自然控制功能的减弱是稻田过量施用氮肥后褐飞虱种群猖獗的主要原因之一。但本研究仅为田间验证性试验,至于氮肥水平在水稻-害虫-天敌三级的关系中扮演者何种角色以及形成机理,有待深入研究。

参考文献 (References):

- [1] Dyck V A, Thomas B. The brown planthopper problem // IRRI, eds. Brown Planthopper: Threat to Rice Production in Asia. Los Baños (Philippines): International Rice Research Institute, 1979: 3-20.
- [2] Cheng J A. Rice Planthoppers in the Past Half Century in China // Heong K L, Cheng J A, Escalada M M, eds. Rice Planthoppers. Netherlands: Springer, 2015: 1-32.
- [3] Lu Z X, Heong K L. Effects of nitrogen-enriched rice plants on ecological fitness of planthoppers // Heong K L, Hardy B, eds. Planthoppers: New Threats to the Sustainability of Intensive Rice Production Systems in Asia. Los Baños (Philippines): International Rice Research Institute, 2009: 247-256.
- [4] Lu Z X, Heong K L, Yu X P, Hu C. Effects of nitrogen on the tolerance of brown planthopper, *Nilaparvata lugens*, to adverse environmental factors. Insect Science, 2005, 12(2): 121-128.
- [5] de Kraker J, Rabbinge R, van Huis A, van Lenteren J C, Heong K L. Impact of nitrogenous-fertilization on the population dynamics and natural control of rice leafhoppers (Lep.: Pyralidae). International Journal of Pest Management, 2000, 46(3): 225-235.
- [6] Schoenly K G, Cohen J E, Heong K L, Litsinger J A, Aquino G B, Barrion A T, Arida G S. Food web dynamics of irrigated rice fields at five elevations in Luzon, Philippines. Bulletin of Entomological Research, 1996, 86(4): 451-466.
- [7] Simpson I C, Roger P A, Oficial R, Grant I F. Effects of nitrogen fertilizer and pesticide management on floodwater ecology in a wetland ricefield: II. Dynamics of microcrustaceans and dipteran larvae. Biology and Fertility of Soils, 1994, 17(2): 138-146.
- [8] Cheng C H. Effect of nitrogen application on the susceptibility in rice to brown planthopper attack. Journal of Taiwan Agricultural Research, 1971, 20(3): 21-30.
- [9] Visarto P, Zalucki M P, Nesbitt H J, Jahn G C. Effect of fertilizer, pesticide treatment, and plant variety on the realized fecundity and survival rates of brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål) (Homoptera: Delphacidae)-generating outbreaks in Cambodia. Journal of Asia-Pacific Entomology, 2001, 4(1): 75-84.
- [10] Rashid M M, Jahan M, Islam K S. Impact of nitrogen, phosphorus and potassium on brown planthopper and tolerance of its host rice plants. Rice Science, 2016, 23(3): 119-131.
- [11] Rashid M M, Jahan M, Islam K S. Response of adult brown planthopper *Nilaparvata lugens* (Stål) to rice nutrient management. Neotropical Entomology, 2016, 45(5): 588-596.
- [12] 陈建明,程家安,何俊华. 温度和食物对黑肩绿盲蝽发育、存活和繁殖的影响. 昆虫学报, 1994, 37(1): 63-70.
- [13] Song Y H, Heong K L. Changes in searching responses with temperature of *Cyrtorhinus lividipennis* (Hemiptera: Miridae) on the eggs of brown the planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål) (Homoptera: Delphacidae). Researches on Population Ecology, 1997, 39(2): 201-206.
- [14] 娄永根,程家安. 水稻品种形态特征对稻虱缨小蜂功能反应的影响. 应用生态学报, 1996, 7(1): 61-66.
- [15] Sigsgaard L, Toft S, Villareal S. Diet-dependent fecundity of the spiders *Atypena formosana* and *Pardosa pseudoannulata*, predators in irrigated rice.

- Agricultural and Forest Entomology, 2001, 3(4): 285-295.
- [16] Claridge M F, Morgan J C, Steenkiste A E, Iman M, Damiyanti D. Experimental field studies on predation and egg parasitism of rice brown planthopper in Indonesia. *Agricultural and Forest Entomology*, 2002, 4(3): 203-209.
- [17] Heong K L, Domingo I. Shifts in predator-prey ranges in response to global warming. *International Rice Research Newsletter*, 1992, 17: 29-30.
- [18] Yu X P, Heong K L, Hu C. Relationship of egg parasitoids of rice planthoppers between rice and non-rice habitats. *Rice Science*, 1996, 4(3): 9-11.
- [19] 吕仲贤, 俞晓平, Heong K L, 胡萃. 氮肥对水稻叶冠层捕食性天敌种群及其自然控制能力的影响. *植物保护学报*, 2006, 33(3): 225-229.
- [20] 周小军, 徐红星, 郑许松, 杨亚军, 陈礼威, 何锦豪, 吕仲贤. 氮肥施用量对杂交稻田白背飞虱和蜘蛛种群数量的影响. *浙江农业学报*, 2012, 24(5): 865-869.
- [21] Price P W, Bouton C E, Gross P, McPherson B A, Thompson J N, Weis A E. Interactions among three trophic levels: influence of plants on interactions between insect herbivores and natural enemies. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1980, 11(1): 41-65.
- [22] Seagraves M P, Lundgren J G. Oviposition response by *Orius insidiosus* (Hemiptera: Anthoridae) to plant quality and prey availability. *Biological Control*, 2010, 55(3): 174-177.
- [23] Sanchez J A, del Amor F M, Flores P, López-Gallego E. Nutritional variations at *Nesidiocoris tenuis* feeding sites and reciprocal interactions between the mirid and tomato plants. *Journal of Applied Entomology*, 2016, 140(3): 161-173.
- [24] Vankosky M A, Vanlaerhoven S L. Plant and prey quality interact to influence the foraging behaviour of an omnivorous insect, *Dicyphus hesperus*. *Animal Behaviour*, 2015, 108: 109-116.
- [25] Vankosky M A, Vanlaerhoven S L. Does host plant quality affect the oviposition decisions of an omnivore? *Insect Science*, 2016, doi: 10.1111/1744-7917.12317.
- [26] Oliveira M D, Barbosa P R R, Silva-Torres C S A, Silva R R, Barros E M, Torres J B. Reproductive performance of striped mealybug *Ferrisia virgata* Cockerell (Hemiptera: Pseudococcidae) on water-stressed cotton plants subjected to nitrogen fertilization. *Arthropod-Plant Interactions*, 2014, 8(5): 461-468.
- [27] Han P, Lavoie A V, Le Bot J, Amiens-Desneux E, Desneux N. Nitrogen and water availability to tomato plants triggers bottom-up effects on the leafminer *Tuta absoluta*. *Scientific Reports*, 2014, 4: 4455, doi: 10.1038/srep04455.
- [28] Mardani-Talaei M, Nouri-Ganblani G, Razmjou J, Hassanpour M, Naseri B, Asgharzadeh A. Effects of chemical, organic and bio-fertilizers on some secondary metabolites in the leaves of bell pepper (*Capsicum annuum*) and their impact on life table parameters of *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae). *Journal of Economic Entomology*, 2016, 109(3): 1231-1240.
- [29] Fox L R, Letourneau D K, Eisenbach J, van Nouhuys S. Parasitism rates and sex ratios of a parasitoid wasp: effects of herbivore and plant quality. *Oecologia*, 1990, 83(3): 414-419.
- [30] Aqueel M A, Leather S R. Nitrogen fertiliser affects the functional response and prey consumption of *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) feeding on cereal aphids. *Annals of Applied Biology*, 2012, 160(1): 6-15.
- [31] Lu Z X, Villareal S, Heong K L. Biodiversity and dynamics of planthoppers and their natural enemies in rice fields with different nitrogen regimes. *Rice Science*, 2006, 13(3): 218-226.
- [32] Mattson Jr W J. Herbivory in relation to plant nitrogen content. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1980, 11: 119-161.
- [33] Symondson W O C, Sunderland K D, Greenstone M H. Can generalist predators be effective biocontrol agents? *Annual Review of Entomology*, 2002, 47: 561-594.
- [34] Matteson P C. Insect pest management in tropical Asian irrigated rice. *Annual Review of Entomology*, 2000, 45: 549-574.
- [35] Shepard M B, Barrion A T, Litsinger J A. Friends of the Rice Farmer: Helpful Insects, Spiders, and Pathogens. Los Baños (Philippines): International Rice Research Institute, 1987.
- [36] Sigsgaard L. Early season natural biological control of insect pests in rice by spiders-and some factors in the management of the cropping system that may affect this control // Scharff N, Toft S, eds. *European Arachnology 2000. Proceedings of the 19th European Colloquium of Arachnology*, Aarhus, 17-22 July 2000. Aarhus: Aarhus University, 2002: 57-64.
- [37] Heong K L, Aquino G B, Barrion A T. Population dynamics of plant- and leafhoppers and their natural enemies in rice ecosystems in the Philippines. *Crop Protection*, 1992, 11(4): 371-379.
- [38] Heong K L, Bleih S, Rubia E G. Prey preference of the wolf spider, *Pardosa pseudoannulata* (Boesenberg et Strand). *Researches on Population Ecology*, 1990, 32(2): 179-186.
- [39] Preap V, Zalucki M P, Jahn G C, Nesbitt H J. Effectiveness of brown planthopper predators: population suppression by two species of spider, *Pardosa pseudoannulata* (Araneae, Lycosidae) and *Araneus inustus* (Araneae, Araneidae). *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2001, 4(2): 187-193.
- [40] Gurr G M, Liu J, Read D M Y, Catindig J L A, Cheng J A, Lan L P, Heong K L. Parasitoids of Asian rice planthopper (Hemiptera: Delphacidae) pests and prospects for enhancing biological control by ecological engineering. *Annals of Applied Biology*, 2011, 158(2): 149-176.
- [41] Heong K L, Chien H V, Escalada M M, Trébuil G. Reducing insecticide use in Southeast Asian irrigated rice fields: From experimental ecology to large scale change in practices. *Cahiers Agricultures*, 2013, 22: 378-384.